



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

成正维

牛原 主编

张斌 赵红敏 副主编

Physics
Experiment

北京交通大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理实验

成正维 牛 原 主 编

张 斌 赵红敏 副主编

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是全国高等学校教学精品课程建设项目的成果,是面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。编写时充分考虑了教育部最新制定的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》。

本书体系新颖,按照物理实验基本方法、专题实验和设计性实验台阶式地组织教学内容。全书共六章,包括测量误差、数据的表示与处理、物理实验常用仪器的使用、物理实验基本方法、专题实验和设计性实验。本书突出实验设计思路,并介绍了一些反映新的实验技术、实验仪器和实验手段的内容。为了不扰乱实验内容的整体性和连续性,一些与实验相关的难点、扩展性内容和最新成果放入该实验后面的选读内容中。

本书可作为高等学校工科各专业的教材和参考书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验 / 成正维, 牛原主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2010.5
ISBN 978-7-5121-0079-4

I. ①大… II. ①成… ②牛… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 045846 号

责任编辑: 谭文芳

出版发行: 北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 203×280 印张: 18 字数: 583 千字

版 次: 2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-0079-4 / O·76

印 数: 0001~4000 册 定价: 39.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前言

本教材主要是为高等学校理工科学生学习“大学物理实验”课程编写的。物理学的原理是普适的，物理实验的基本方法和技术也不会由于学生的专业不同产生实质性的区别，所以本书也适用于其他专业的学生阅读参考。

物理实验的地位与作用

物理学是研究物质结构和相互作用以及它们运动规律的科学，是一切自然科学的基础。古希腊人将物理学称作“自然哲学”。其实在更古老的年代，从人类的祖先学会思考开始，就不断地观察周围世界、探索总结斗转星移、四季交替、气象万千等大自然变化的规律。但是其后几千年内，人们没有并建立起科学的物理学原理和方法。重要的转折发生在 17 世纪。1687 年牛顿发表《自然哲学的数学原理》，使得物理学成为一门精密的科学，促进了经典物理学的发展。20 世纪初量子论和相对论的建立，又开辟了近代物理的新纪元。近 300 年物理学的发展同时推动了其他科学技术的发展，为现代文明做出了不可替代的巨大贡献。

物理学本质上是一门实验科学。物理学理论的建立无不依赖实验结果的总结或经过实验的检验。正是在伽利略、牛顿等人的实验基础之上建立了经典力学，这些原理至今仍是我们的“神舟”巡天、“嫦娥”探月精密轨道计算的理论依据。在温度测量、能量转换与守恒定律、气体状态方程等实验研究的基础上建立了经典热力学理论。经典力学和热力学理论的建立带动了蒸汽机的广泛应用，成为第一次技术革命的重要标志。作为第二次技术革命基础的电磁学理论则离不开大量的电学、磁学和电磁感应等实验。电力技术的发展催生了许多新实验技术并扩展了实验领域，导致了电子、X 射线和放射性等重大发现。对“以太”和黑体辐射的实验探索发现了经典理论难以解释的现象，同时也导致了相对论和量子理论的建立。

物理实验创造了物理学本身，也改变了人类的生活和工作方式。这些影响作用并不会随着技术的不断完善而弱化。例如，有分析报告指出，全球的石油资源仅够使用 40 年，天然气可以使用 60 年，煤炭的使用寿命会更长些，但是终有消耗完的时候。探索新能源的任务显得异常艰巨而重要，核能、太阳能应用和新电池等应用技术的突破期待着物理学家和工程师携手合作。再如，1993 年 Intel 公司生产的奔腾处理器采用的是 800 纳米技术，而 2008 年生产的酷睿 2 采用了 45 纳米技术，15 年间降低到原来的 17%。但是继续提高集成度终将受制于晶片的物理极限。下一代的计算机是量子计算机、光子计算机，还是其他的什么？这都是有待物理实验工作者参与解决的难题。

为什么要上物理实验课

本教材的大多读者是非物理学专业的，学生们或许希望成为一名高新技术开发工程师，或许想成为一名建筑师，或许想做一名企业高管，或有志自己去创业。这些学生有必要上物理实验课吗？答案是肯定

的。因为在大学物理实验这门课程中,实验的主要目的不是验证物理原理,而是以物理内容为载体,传授科学实验研究的思想、方法和实验技术。

适应新的学习模式

过去人们常把学习称为“读书”。其实人们更多是通过观察、实验和归纳而认识未知世界的。即使是通过“读书”学习已有知识,也是间接学习前人的实验和总结。通过实验发现新现象——归纳总结实验规律、建立理论模型——实验检验并发现新现象——修正理论模型,如此循环发展,是人类认识未知世界最基本的模式。实际工作中遇到不解的难题到哪里去找答案?到实验中去寻找答案——这是许多学生过去不善于采用的方式。

让学生适应并逐渐掌握通过实验进行学习的方法,是我们课程的任务之一。这些方法也势必使学生在将来其他学科的研究与工作中受益。

提升动手能力

动手能力不仅仅是活动十个手指头的问题。我们常用心灵手巧来形容一个人动手能力强,可见手巧是与心灵联系在一起的,是动手与动脑的协调。实验中从何处下手、如何动手,这些既是技术问题,也需要头脑有思路。所以需要通过实验课进行专门系统的动手能力训练。

中国还有一个成语叫熟能生巧,动手能力的提高需要不断实践、不断积累经验。大学物理实验始于大学一年级,起步早,课时多,基础性强且内容覆盖面广,是积累实验经验的最好机会。

实验能力的高低是一个人素质的综合体现。我们生活中有这样的经验:一个能工巧匠往往是多项技艺在身。也就是说,动手能力是不受具体学科内容限制的,做物理实验的能手也奠定做好其他实验的坚实基础。学好物理实验课会让学生在后续的大学学习中受益丰厚。

夯实工程技术基础

当然,物理实验课中最直接学习的是各种各样的物理量测量技术和实验仪器的使用方法。物理实验与其他学科关联紧密,如长度、质量等力学量的测量,电流、电压、磁场等电磁学量的测量,温度的测量,光强度测量等都是各工程专业实验甚至日常生活中经常用到的。

除此之外,物理实验课还训练学生进行正确的数据记录、数据处理和误差分析。对大多数专业学生来说,这是在大学中系统学习这些内容的唯一课程。

培养实事求是的学风

物理实验课特别重视培养实事求是的工作作风。科学实验就是要如实地反映客观事实,数据是神圣的,没有依据不能做任何修改。在实验课程中编造、抄袭数据是学风不正的表现,将来在科学研究中篡改数据是学术道德问题,后果严重的甚至要承担法律责任。由于实验条件和学生技术限制,有些学生的实验数据不很准确,这是完全可以理解的。学生如果怀疑自己的实验数据,应该分析是否误差过大,找出产生过大误差的主要原因,调整实验装置和参数重新做实验。不作假是做物理实验的最低要求,也是对学生做人、做事的最基本要求。

如何做好物理实验

态度决定一切

尽管学生入学时物理实验基础差异很大,但是这些差异决不是影响实验课学习效果的重要因素。在我们的课程里,实验技术和能力的训练是循序渐进安排的,适于所有学生学习。只要学生们重视实验课,精心准备、认真实践、虚心求教,都能做好物理实验。

预习与总结

做实验前应该认真预习，清楚地知道自己要做什么，原理是什么，打算怎么做。为达到这样的要求，需要课前认真阅读教材（实验指导书），或登录课程网站查阅相关资料。实验老师会要求学生回答一些问题，检查预习情况。有时一个实验涉及另一个或另几个实验的内容，这时就有必要阅读教材的其他章节。本书对实验原理的表述一般都比较简洁，鼓励学生阅读大学物理教材或其他文献，以求更深入的理解。

独立与合作

物理实验课中比较强调学生独立工作能力的训练。所谓“独立”，就是自己预习、自己准备、自己操作、自己总结。“独立”不排斥寻求同学和老师的帮助。我们希望学生要慎重求援。遇到疑问没有经过认真思考不开口问，遇到困难没有采取措施尝试解决不开口问。老师也不应该手把手教学生操作，而是提倡给予适当的启发和引导。

与人交流、互相合作也是一种重要的工作能力。实验课中会安排一些多人共同完成的实验。不要将合做与独立工作完全对立起来，参加合做的学生没有主次之分，应该分工明确，各负其责，合作之中有“独立”。合做实验允许采用共同的原始数据，但是必须有独立的分析处理，独立的实验报告。

分析与创新

学生不应该满足于按照教材指定步骤机械地操作而不求甚解。在得到实验结果后要多问几个为什么。然后认真分析研究，力求有所感悟。既要知道这些数据说明了什么，还应该知道这些结果有什么局限，怎样才可以将实验做得更好。测试了一堆数据不意味完成了实验。数据是死的，正确地分析处理才能使数据的意义充分显示出来。

物理实验课还要培养学生创新实验的能力。首先提倡学生能对实验某一方面提出自己的改进见解，可能的话可以动手实施。在设计性实验中会对学生设计实验的能力提出更具体的要求。有兴趣的学生可以参加各种形式的课外创新实验，逐步树立创新意识，培养创新能力。

实验室守则

认真听讲解

即使已经做好了预习，仍然需要在实验前认真听老师讲解。老师的讲解决不是教材内容的简单重复，而是提纲挈领，讲思路、讲要点、讲注意事项。认真听讲往往可以达到事半功倍的效果。

安全第一

电源、热源、强光源是物理实验室最常见的设备，如有不慎会造成人身伤害。物理实验室设备及元器件种类繁多，使用率高。不当的使用可能直接导致设备损坏或缩短使用寿命，既造成经济损失又影响其他同学做实验。应注意老师提示和实验室安全标志警示，严格遵循操作规程，确保人员及设备安全。在老师允许之前，不要擅自启动设备。

维护实验室环境整洁

学生要养成良好习惯，随时维护实验室整洁。书包、水杯等物品不应放在实验台上。实验用仪器安放布局要合理，避免凌乱。实验后将仪器设备复原，及时清理废纸、杂物，并擦拭桌面。

关于本书的编写

本书成书之前,在北京交通大学已经试用了两年,期间进行了不断的修改。

在教材内容的编写上,我们注重对实验背景、实验设计思路的介绍。在介绍了实验误差理论和数据处理方法后,在第三章介绍了实验室常用仪器的使用,在第四章以实验基本方法为主线,介绍了共振法等相关实验,在第五章将内容相关的实验组合成专题实验的形式呈现在读者面前,如不同实验方法研究同一个物理量、同一物理现象在实验内容上循序渐进进行研究,等等,以期使学生达到认识深刻的目的。为了不扰乱实验内容的整体性和连续性,与实验相关的难点和扩展性内容,我们放入该实验后面的选读内容中。针对不同的教学方法和教学改革,我们建议分两个学期安排教学:第一学期主要进行误差理论、数据处理、常用仪器使用实验和基本实验方法的实验的教学,第二学期主要进行综合性专题实验和设计性实验的教学。

参加本书编写的有:成正维、张斌、赵红敏、范玲、滕永平和牛原。在本书的试用与最后校对中,北京交通大学参与大学物理实验课程教学的老师们提出了很多好的建议,并给予了诸多无私的帮助,编者十分感谢!另外,成正维教授为本书的整体设计付出了很多心血,并编写了部分章节。不幸的是,在本书即将出版的时候,成正维教授因病去世。本书的出版也是对成正维教授最好的纪念。最后要感谢北京交通大学出版社对本书的出版给予的大力支持,以及谭文芳编辑付出的辛勤劳动。

由于时间仓促,本书还存在不少疏漏和错误,希望各位老师和学生在使用过程中提出宝贵意见。

我们在美国加州大学伯克利分校物理实验室的墙上看到一段话,抄录给中国的学生:

Whose job is it to keep physics lab clean?

This is a story about four people named Everybody, Somebody, Anybody and Nobody. The resistors, capacitors and the line need to be put away, and Everybody was sure that Somebody would do it. Anybody could have done it, but Nobody did it and the place got messier. Somebody got angry about that because it was Everybody's job. Everybody thought Anybody could do it but Nobody realized that Everybody couldn't do it. It ended up that only Nobody can find where the parts are, and Everybody blamed Somebody when Nobody did what Anybody could have done.

So EVERYBODY, please do your share and keep Physics Lab clean.

物理实验室的大门敞开着,为每一位学生提供了平等的学习机会,就看大家能不能很好把握。命运青睐有心人,多一份付出就会多一份收获。希望我们的学生扎扎实实,从头做起!

编者

2010年2月

目录

第 1 章 测量误差	1
1.1 测量与误差	1
1.1.1 直接测量与间接测量	1
1.1.2 最佳估计值与偏差	2
1.1.3 误差的分类	3
1.2 系统误差处理	4
1.2.1 发现系统误差的方法	4
1.2.2 系统误差的减小与消除	4
1.3 随机误差处理	5
1.3.1 随机误差及其分布	5
1.3.2 标准差	7
1.3.3 坏值的剔除	8
1.3.4 仪器误差	9
1.4 测量值的有效数字	11
1.4.1 有效数字的一般概念	11
1.4.2 直接测量量的有效数字读取	11
1.4.3 间接测量量有效数字的运算	12
1.4.4 有效数字尾数的舍入法则	12
1.5 测量结果的不确定度	13
1.5.1 测量不确定度的基本概念	13
1.5.2 直接测量结果的不确定度评定	14
1.5.3 间接测量量的不确定度评定	16
练习题	18
第 2 章 数据的表示与处理	21
2.1 数据的表示	21
2.1.1 列表法	21
2.1.2 作图法	22
2.2 线性回归	23
2.2.1 图解法	23
2.2.2 最小二乘法	24
2.2.3 曲线改直	26

2.3 Excel 用于处理物理实验数据	27
2.3.1 Excel 用于误差计算	27
2.3.2 Excel 用于绘制实验曲线	27
练习题	31
第 3 章 物理实验常用仪器的使用	33
3.1 基本物理量测量及实验室常用器具	33
3.1.1 长度的测量及常用器具	33
3.1.2 质量的测量及常用器具	36
3.1.3 时间的测量及常用器具	37
3.1.4 电学量的测量及常用器具	38
3.1.5 温度的测量及器具	45
3.1.6 光源	46
3.2 基本操作技术	47
3.2.1 仪器调整与通用操作技术	47
3.2.2 电学实验和光学实验的专门技术	49
3.3 预备性操作练习	50
3.3.1 游标卡尺测金属杯体积	50
3.3.2 千分尺测钢珠体积	51
3.3.3 读数显微镜测毛细管内外径	51
3.3.4 流体静力称衡法测物体密度	52
3.3.5 焦利秤研究谐振动	53
3.3.6 单摆测重力加速度	54
3.3.7 在气轨上测量加速度	55
3.3.8 电势差计的使用	57
3.3.9 黑盒子实验	57
3.3.10 混合法测固体的比热容	58
3.3.11 测薄透镜焦距	59
3.4 常用仪器使用实验	61
3.4.1 滑线变阻器与二极管伏安特性	61
3.4.2 示波器的使用	63
3.4.3 分光计的调整和使用	72
3.4.4 杨氏模量的静态法测量	80
3.4.5 刚体转动惯量的测量	84
3.4.6 等厚干涉测量与读数显微镜的使用	89
第 4 章 物理实验基本方法	94
4.1 基本实验方法	94
4.1.1 比较测量法	95
4.1.2 放大测量法	96
4.1.3 平衡测量法	96
4.1.4 补偿测量法	97
4.1.5 模拟测量法	98

4.1.6 转换测量法	98
4.2 共振法实验	99
4.2.1 声速测量	99
4.2.2 共振法测杨氏模量	103
4.3 电桥法实验	108
4.3.1 电桥法测电阻	109
4.3.2 电阻应变片研究与杨氏模量的测量	114
4.3.3 直流非平衡电桥的原理及应用	118
4.4 磁场和磁性能测量	122
4.4.1 软磁材料磁滞回线和基本磁化曲线	125
4.4.2 用冲击电流计测螺线管内磁场	129
4.4.3 霍耳效应测磁场	133
4.5 温度的测量及其应用	137
4.5.1 不良导体热导率的测量	140
4.5.2 PN 结正向压降的温度特性研究	145
4.5.3 高温超导电阻——温度特性的测量	148
4.6 波动光学实验	151
4.6.1 双棱镜干涉测量光波波长	152
4.6.2 迈克耳孙干涉仪测量激光波长	156
4.6.3 偏振光及其应用	160
4.6.4 利用超声光栅测定液体中声速	168
4.7 微电流测量及数字技术	171
4.7.1 光电效应	172
4.7.2 弗兰克-赫兹实验	179
第 5 章 专题实验	184
5.1 电子特性	184
5.1.1 用密立根油滴仪测量电子电量	185
5.1.2 金属电子逸出功的测定	190
5.1.3 电子在电场磁场中的运动及电子比荷的测定	194
5.2 波的衍射	200
5.2.1 光波的大琅和费衍射	201
5.2.2 透射光栅衍射	204
5.2.3 微波布拉格衍射	206
5.2.4 X 射线晶体衍射	210
5.2.5 电子衍射	213
5.3 光源光谱	216
5.3.1 棱镜光谱与光栅光谱	217
5.3.2 小型棱镜读(摄)谱仪测氢原子光谱	219
5.3.3 光栅光谱仪测光谱	223
5.4 超声波原理及应用	226
5.4.1 超声波的产生与传播	227

5.4.2 固体弹性常数的测量	232
5.4.3 超声波探测	235
5.4.4 超声波成像基本原理	238
5.5 迈克尔孙干涉仪	241
5.5.1 测量钠光双线的波长差	242
5.5.2 白光干涉测量平板玻璃折射率	243
5.5.3 法布里-珀罗干涉仪测钠光双线波长差	245
5.6 光纤技术	249
5.6.1 光源与光纤特性	250
5.6.2 光信号传输	253
5.6.3 光纤传感	255
第6章 设计性实验	259
6.1 实验设计基础知识	259
6.1.1 物理模型的建立	260
6.1.2 物理模型的选择与选择	260
6.1.3 实验方法的选择	261
6.1.4 测量仪器的选择与配套	261
6.1.5 测量条件与实验参数的确定	262
6.1.6 实验参数的拟定	262
6.1.7 实验设计报告	263
6.1.8 实验操作	263
6.1.9 数据处理及撰写报告	263
6.1.10 实验设计举例	263
6.2 设计性实验题目	265
6.2.1 玻璃折射率的测定	265
6.2.2 测量不规则物体的密度	266
6.2.3 电容和电感的测量	266
6.2.4 冲击法测量软磁材料静态磁特性	267
6.2.5 超声波测量液体浓度	267
6.2.6 重力加速度的测定	268
6.2.7 用非接触法测距	268
6.2.8 霍尔传感器的应用	269
6.2.9 液位的测量	269
6.2.10 光敏器件的研究	270
6.2.11 碰撞时瞬态力的研究	270
6.2.12 乐器(吉他)弦振动的研究	271
6.2.13 全息光栅的制作	271
6.2.14 万用表的设计与组装	272
6.2.15 弦驻波法测量交流电频率的装置	273
6.2.16 显微镜和望远镜的组装	273
6.2.17 电子温度计的组装	274
常用物理常量表	275

第 1 章

测量误差

物理实验的任务，不仅仅是定性地观察物理现象，也需要对物理量进行定量的测量，并找出各物理量之间的内在联系。

由于测量原理的局限性或近似性，测量方法的不完善、测量仪器的精度限制、测量环境的不理想以及测量者的实验技能等诸多因素的影响，所有测量都只能达到相对地准确。随着科学技术不断发展，人们的知识、手段、经验、技巧不断提高，测量误差被控制得越来越小，但是绝对不可能使误差降为零。因此，作为一个测量结果，不仅应该给出被测对象的量值和单位，而且还必须对量值的可靠性（或不确定度）做出评价。

本章介绍测量与误差、误差处理、有效数字、测量结果的不确定度评定等基本知识和基本方法，这些知识不仅在本课程的实验中要经常用到，而且也是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

1.1 测量与误差

1.1.1 直接测量与间接测量

所谓测量就是借助一定的实验器具，通过一定的实验方法，直接或间接地把待测量与选做计量标准单位的同类物理量进行比较的全部操作。简而言之，测量是指为确定被测对象的量值而进行的一组操作。

1. 直接测量

直接从仪器或量具上读出待测量的大小，称为直接测量。由直接测量得到的物理量称为直接测量量。用米尺测物体的长度，用秒表测时间间隔，用天平测物体的质量等都是直接测量。

2. 间接测量

由若干个直接测量量经过一定的运算或其他处理后获得待测量，称为间接测量。由间接测量得到的物理量称为间接测量量。

例如：先直接测出匀质球的质量 m 和直径 D ，再根据公式 $\rho = \frac{6m}{\pi D^3}$ 计算出铁的密度 ρ 就是间接测量。

选读

等精度测量

按照测量条件的不同,测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

在相同的测量条件下进行的一系列测量是等精度测量。例如:同一个人,使用同一仪器,采用同样的方法,对同一待测量连续进行多次测量,应该认为每次测量的可靠程度都相同,故称之为等精度测量,这样的一组测量值称为一个测量列。

在不同测量条件下进行的一系列测量,如使用的仪器不同,方法不同,测量人员不同,各次测量结果的可靠程度自然也不相同,这样的测量称为不等精度测量。处理不等精度测量的结果时,需要根据每个测量值的“权重”,进行“加权平均”,在一般物理实验中很少采用。

等精度测量的误差分析和数据处理比较容易,作为基础,本书所介绍的误差和数据处理知识都是针对等精度测量的。

1.1.2 最佳估计值与偏差

1. 真值

任何一个物理量,在一定的条件下,都具有确定的量值,这个客观存在的量值称为该物理量的真值。

绝大多数情况真值是未知的。物理测量的目的就是要力图得到被测量的真值。

在物理实验中有时将一些特殊值作为约定真值或相对真值使用:如国际计量组织公布的电子电量 e 、普朗克常数 h 等物理常量,标准电阻、标准砝码等误差相对较小的器件标定值等。仅在极少情况下,真值是已知的。例如,三角形的三个内角之和是 180° ,真空磁导率是 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ 。

2. 最佳值

在实际测量中,为了减小误差,常常对某一物理量 X 进行 n 次等精度测量,得到一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则测量结果的算术平均值为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1-1)$$

尽量减小系统误差之后,算术平均值可作为测量的最佳估计值,简称最佳值,亦称为近真值。

3. 误差

我们把测量值与真值之差称为测量的绝对误差(简称误差)。

设被测量的真值为 x_0 , 测量值为 x , 则绝对误差 ε 为

$$\varepsilon = x - x_0 \quad (1.1-2)$$

同时我们定义 $\frac{x - x_0}{x_0}$ 为相对误差。

由于误差不可避免,故真值是不能通过测量而准确得到的。同样,多数场合下也无法确切得知误差的值。

4. 偏差

我们把测量值与最佳值之差称为偏差(或残差)。

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1.1-3)$$

在经过多次测量之后,最佳值是可行的,所以其中任意一次测量的偏差也是可行的。我们可以用各次测量偏差的分布情况来评价测量结果的准确度。

1.1.3 误差的分类

正常测量的误差按其产生的原因和性质可以分为系统误差和随机误差两类,它们对测量结果的影响不同,对这两类误差处理的方法也不同。

1. 系统误差

在同样条件下,对同一物理量进行多次测量,其误差的大小和符号保持不变或随着测量条件的变化有规律地变化,这类误差称为系统误差。

系统误差的特征是具有确定性,它的来源主要有以下几个方面。

仪器因素:由于仪器本身的固有缺陷或没有按规定条件调整到位而引起的误差。例如:仪器标尺的刻度不准确,零点没有调准,等臂天平的臂长不等,砝码磨损,测量显微镜精密螺杆存在回程差,或仪器没有放水平、偏心等。

理论或条件因素:由于测量所依据的理论本身的近似性或实验条件不能达到理论公式所规定的要求而引起的误差。例如:测量质量时没有考虑空气浮力的影响,用单摆测量重力加速度时难以满足摆角 $\theta \rightarrow 0$ 的条件等。

人员因素:由于测量人员主观因素和操作技术所引起的误差。例如:使用停表计时,有人总是操之过急,计时比真值短;有人则反应迟缓,计时总是比真值长。又如有的人肉眼对准目标时,总爱偏左或偏右,致使读数偏大或偏小。

对于实验者来说,系统误差的规律及其产生原因,可能知道,也可能不知道。已被确切掌握其大小和符号的系统误差称为可定系统误差;对于大小和符号不能确切掌握的系统误差称为未定系统误差。前者一般可以在测量过程中采取措施予以消除,或在测量结果中进行修正。而后者一般难以做出修正,只能估计其取值范围。

2. 随机误差

在相同条件下,多次测量同一物理量时,即使已经精心排除了系统误差的影响,也会发现每次测量结果都不一样,这种误差称为随机误差。

在测量次数足够多时,可以发现随机误差并非完全没有规律,而是服从某种统计规律。

随机误差是由测量过程中一些随机的或不确定的因素引起的。例如:仪器的灵敏度和稳定性有限,实验环境中的温度、湿度、气流变化,电源电压起伏,微小振动以及杂散电磁场等都会导致随机误差。

除系统误差和随机误差外,还有过失误差。过失误差又称粗大误差,是由于实验者操作不当或粗心大意造成的。例如:看错刻度、读错数字、记错单位或计算错误等。含有过失误差的测量结果称为“坏值”,被判定为坏值的测量结果应剔除不用。实验中的过失误差不属于正常测量的范畴,应该严格避免。

3. 精密度、正确度、准确度

定性评价测量结果,常用到精密度、正确度和准确度这三个概念。这三者的含义不同,使用时应加以区别。

精密度:反映随机误差大小的程度。它是对测量结果的重复性的评价。

精密度高是指测量的重复性好,各次测量值的分布密集,随机误差小。但是精密度不能确定系统误差

的大小。

正确度：反映系统误差大小的程度。

正确度高是指测量数据的算术平均值偏离真值较少，测量的系统误差小。但是正确度不能确定数据分散的情况，即不能反映随机误差的大小。

准确度：反映系统误差与随机误差综合大小的程度。

准确度高是指测量结果精密度、正确度均高，即随机误差与系统误差均小。

现以测量某物体在平面上的位置为例，形象说明以上三个术语的意义。如图 1.1-1 所示，图中小黑点表示各次测量得到的位置坐标，坐标原点是位置的真值坐标。其中，图（a）表示精密度高而正确度低；图（b）表示正确度高而精密度低；图（c）表示精密度、正确度均低，即准确度低；图（d）表示精密度、正确度均高，即准确度高。

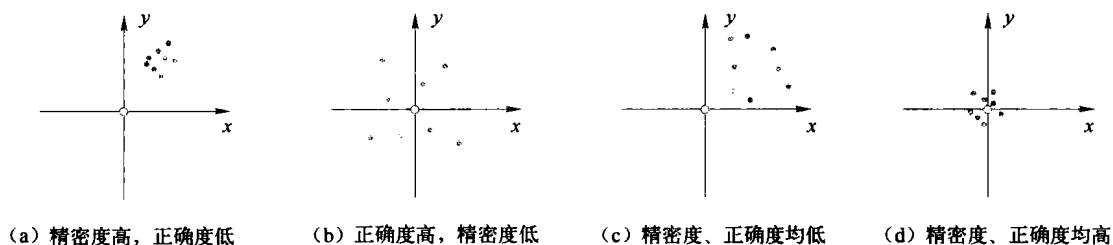


图 1.1-1 精密度、正确度与准确度

1.2 系统误差处理

1.2.1 发现系统误差的方法

系统误差一般难以发现，并且不能通过多次测量来消除。人们通过长期实践和理论研究，总结出一些发现系统误差的方法，常用的有以下几种。

理论分析法：分析实验所依据的理论和实验方法是否有不完善的地方；检查理论公式所要求的条件是否得到了满足，量具和仪器是否存在缺陷，实验环境能否使仪器正常工作以及实验人员的心理和技术素质是否存在造成系统误差的因素等。

实验对比法：对同一待测量可以采用不同的实验方法，使用不同的实验仪器，以及由不同的测量人员进行测量。对比、研究测值变化的情况，可以发现系统误差的存在。

数据分析法：因为随机误差是遵从统计分布规律的，所以若测量结果不服从统计规律，则说明存在系统误差。我们可以按照测量列的先后次序，把偏差（残差）列表或作图，观察其数值变化的规律。比如前后偏差的大小是递增或递减的；偏差的数值和符号有规律地交替变化；在某些测量条件下，偏差均为正号（或负号），条件变化以后偏差又都变化为负号（或正号）等情况，都可以判断存在系统误差。

1.2.2 系统误差的减小与消除

知道了系统误差的来源，也就为减小和消除系统误差提供了依据。

首先要减小与消除产生系统误差的根源。对实验可能产生误差的因素尽可能予以处理。例如：尽量采用更符合实际的理论公式，保证仪器装置良好，满足仪器规定的使用条件，等等。

其次，利用实验技巧，改进测量方法。对于定值系统误差的消除，可以采用如下一些技巧和方法。

交换法：根据误差产生的原因，在一次测量之后，把某些测量条件交换一下再次测量。例如：用天平称质量时，把被测物和砝码交换位置进行两次测量。设 m_1 和 m_2 分别为两次测得的质量，取物体的质量为 $m = \sqrt{m_1 \cdot m_2}$ ，就可以消除天平不等臂而产生的系统误差。

替代法：在测量条件不变的情况下，先测得未知量，然后再用一已知标准量取代被测量，而不引起指示值的改变，于是被测量就等于这个标准量。例如：用惠斯通电桥测电阻时，先接入被测电阻，使电桥平衡，然后再用标准电阻替代被测量，使电桥仍然达到平衡，则被测电阻值等于标准电阻值。这样可以消除桥臂电阻不准确而造成的系统误差。

倒号法：改变测量中的电流方向、磁场方向等条件，取多次测量的平均值作为测量结果。例如：用霍耳元件测磁场实验中，先在一定的磁场方向和工作电流方向情况下测量霍耳电势差，然后分别改变磁场方向、工作电流的方向再次进行测量，取四种条件下测量电势差 U_H 的平均值就可以减小或消除不等位电势、温差电势等附加效应所产生的系统误差。

在采取消除系统误差的措施后，还应对其他的已定系统误差进行分析，用修正公式或修正曲线对测量结果进行修正。例如：千分尺的测量值减去零点读数就是一种修正；标准电池的电动势随温度的变化可以根据公式修正；电表校准后可以给出校准曲线；等等。对于无法忽略又无法消除或修正的未定系统误差，可用估计误差极限值的方法进行估算。

以上仅就系统误差的发现及消除方法作了一般性介绍。在实际问题中，系统误差的处理是一件复杂而困难的工作，它不仅涉及许多知识，还要有丰富的经验，这需要在长期的实践中不断积累经验，不断提高。

1.3 随机误差处理

实验中随机误差不可避免，也不可能消除。但是可以根据随机误差的理论来估算其大小。为了简化问题，在下面讨论随机误差的有关问题中，假设系统误差已经减小到可以忽略的程度。

1.3.1 随机误差及其分布

1. 测量值的分布函数

对于任意一次测量，测量结果的随机误差是不确定的。但是当测量次数足够多时，随机误差的分布可以用误差分布函数来描述。

设对某物理量进行测量，随机误差值分布在到 $\varepsilon + d\varepsilon$ 间的概率为 dP ，则可以定义误差的分布函数为

$$f(\varepsilon) = \frac{dP}{d\varepsilon} \quad (1.3-1)$$

分布函数是误差 ε 分布在单位间隔内的概率，又称概率密度函数。

分布函数曲线示意图如图 1.3-1 (a) 所示。根据上面定义，误差分布在 $\varepsilon \rightarrow \varepsilon + d\varepsilon$ 之间的概率为

$$dP = f(\varepsilon)d\varepsilon$$

在 ε 处, 以 $d\varepsilon$ 为宽, $f(\varepsilon)$ 为高, 作一狭长矩形, 如图 1.3-1 (b) 所示。此狭长矩形的面积为 $dP = f(\varepsilon)d\varepsilon$, 数值上恰好等于误差分布在此间隔内的概率。 $f(\varepsilon)$ 越大, 误差在对应 ε 附近的概率也就越大。

给定任意两个误差值 ε_1 、 ε_2 , 如图 1.3-1 (c) 所示, 随机误差分布在区间的概率为

$$P_{\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_2} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1.3-2)$$

它正好是图中阴影部分的面积。按照概率理论, 误差 ε 出现在区间 $(-\infty, \infty)$ 范围内是必然的, 即概率为百分之百, 所以图中曲线与横轴所包围的面积应恒等于 1, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1$$

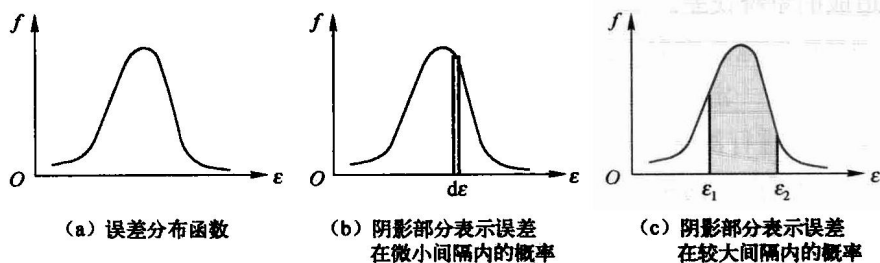


图 1.3-1 误差分布示意图

2. 正态分布

在物理实验中, 大多数情况下随机误差都是按正态分布 (或称高斯分布)。可以导出误差的正态分布函数的表达式为

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3-3)$$

误差的正态分布函数式 (1.3-3) 中唯一的待定参量就是 σ , 它的物理意义是什么呢? 首先定性分析一下: 从公式可以看出, 当 $\varepsilon=0$ 时

$$f(0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

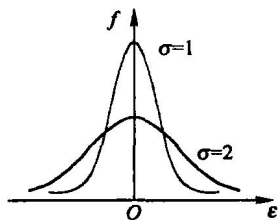


图 1.3-2 正态分布

$f(0)$ 是分布函数的峰值。 σ 值越小, 概率密度函数的峰值越高。由于曲线与横坐标轴包围的面积恒等于 1, 所以曲线峰值高, 两侧下降就较快, 说明测量值的离散性小, 测量的精密度高。相反, 如果 σ 值大, $f(0)$ 就小, 误差分布的范围就较大, 测量的精密度低。 $\sigma=1$ 或 $\sigma=2$ 两种情况的正态分布曲线如图 1.3-2 所示。

再分析一下误差分布在 $\pm\sigma$ 区间的概率。

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} d\varepsilon$$

设 $\zeta = \frac{\varepsilon}{\sigma}$, 查表计算定积分, 上述积分为

$$\int_{-\sigma}^{\sigma} f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^1 e^{-\frac{\zeta^2}{2}} d\zeta = 0.683$$

即任意一次测量的误差分布在 $\pm\sigma$ 区间, 或者等同于说测量值分布在 $x_0 \pm \sigma$ 之间的概率为 68.3%。这里同